



Рис. 3. Экспериментальный автомобиль МГТУ им. Н.Э. Баумана

Проведена серия ходовых испытаний, доказавших пригодность автомобиля для условий реальной эксплуатации в городских условиях.

Были проведены контрольные испытания автомобиля-рефрижератора ЗИЛ-47303А "Бычок", работающего на смесевом топливе, по типовым методикам на автополигоне ГУП "НИЦИАМТ". Контролю подвергались содержание ВВ в кабине автомобиля и в ОГ, расход топлив; скоростные и динамические качества автомобиля. Подтверждено сохранение или улучшение экономических показателей автомобиля на смесевом топливе, сохранение условий работы водителя, улучшение экологических показателей автомобиля. Применение ДМЭ позволило приблизить содержание вредных веществ в ОГ к нормам Евро-III без использования нейтрализаторов на автомобилях, находящихся в эксплуатации. Использование ДМЭ уменьшило шумность работы дизеля ввиду большего цетанового числа и меньшего опережения впрыскивания.

УДК.621.1.018

А.П. Поливянчук, канд. техн. наук, И.В. Парсаданов, д-р техн. наук,
И.В. Рыкова, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ НА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Введение

С введением в 1993 г. экологических норм EURO в странах Европейского Союза начали дейст-

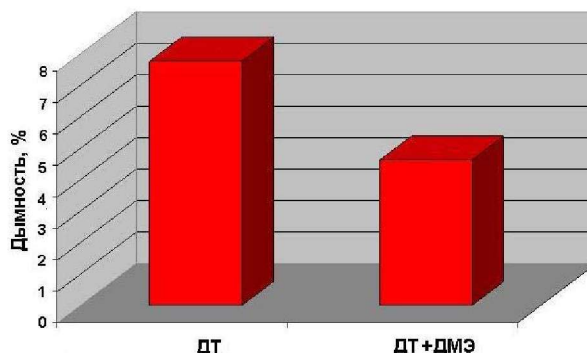


Рис. 4. Дымность ОГ на режиме максимальной частоты холостого хода при работе на дизельном и на бинарном топливе при подаче 22% ДМЭ

ДМЭ использовался как хладагент для первых холодильных установок. С учетом отсутствия у него озоноразрушающих свойств интерес к нему возобновился. На переоборудованных автомобилях использовались холодильные установки на ДМЭ. Это также уменьшило энергопотребление на привод компрессора.

Заключение

Результаты работы подтвердили эффективность концепции смесового топлива для условий эксплуатации грузового автомобиля в городе. Перспективы работ по применению ДМЭ усматриваются в использовании электронного управления, оптимизирующего протекание рабочего процесса.

Список литературы:

1. Работа дизелей на нетрадиционных топливах / [В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др.]. – М.: Легисон-Автодата, 2008. – 464 с.
2. Программный комплекс "ВПРЫСК". Возможности и состав. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи в двигателях внутреннего сгорания [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://energy.power.bmstu.ru/e02/inject/i00rus.htm>.

вовать ограничения на массовые выбросы твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) автомобильных дизелей. ТЧ характеризуются высокой кан-

церогенностью, показатель относительной агрессивности ТЧ считают равным 200 (для сравнения данный показатель для оксидов азота равен 41,1, для углеводов – 3,16) [1].

В результате поэтапного ужесточения норм EURO к 2009 г. допустимые уровни выбросов ТЧ снизились наиболее существенно по сравнению с другими нормируемыми показателями токсичности ОГ дизелей: для двигателей легковых автомобилей – с 0,14 до 0,005 г/км или в 28 раз, для двигателей грузовых автомобилей – с 0,36 до 0,02 г/кВт·ч или в 18 раз [2].

Оценку влияния ТЧ на окружающую среду можно дать используя различные методы, например, приведенную в работе [3]. Но для такой оценки необходимо знать значения выбросов на каждом из возможных режимов работы автомобильного дизеля. Для получения таких данных требуется проведение экспериментальных исследований дизеля с определением выбросов ТЧ с последующим анализом полученных данных. Усилиями ученых и специалистов Национального технического университета «ХПИ» и Восточноукраинского национального университета им. В. Даля подготовлен испытательный стенд автомобильного дизеля 4ЧН12/14, оборудованный системой контроля выбросов ТЧ, на базе которого проведена оценка выбросов ТЧ на установившихся режимах работы дизеля.

Постановка задачи

Целью исследований являлось определение ТЧ с ОГ автомобильного дизеля, анализ полученных данных и построение регрессионных зависимостей, описывающих влияние частоты вращения коленча-

того вала n (мин⁻¹) и нагрузки L (% от максимального крутящего момента при текущей n) на массовый выброс – PT_m (г/ч), удельный выброс – PT (г/кВт·ч) и концентрацию ТЧ – $C_{ТЧ}$ (г/мн³).

Для достижения данной цели решены следующие задачи:

1. Проведение экспериментальных исследований дизеля на выбранных контрольных режимах с измерением массовых, удельных выбросов и концентраций ТЧ.
2. Анализ результатов исследований.
3. Получение уравнений регрессии, отражающих влияние параметров n и L на величины PT_m , PT и $C_{ТЧ}$.
4. Обобщение результатов исследований.

Методика проведения исследований. Результаты исследований

При выборе контрольных режимов работы дизеля использовался принцип максимального учета диапазона эксплуатационных параметров n и L при равномерном характере их изменения. На основе данного принципа был выбран 2-факторный план 3×4 (включающий 12 установившихся режимов испытаний) с 3-мя уровнями варьирования параметра n – 1000, 1500 и 2000 мин⁻¹ и 4-мя уровнями варьирования параметра L – 25, 50, 75 и 100%.

Для определения массового, удельного выбросов и концентрации ТЧ использовался экспериментальный образец измерительного комплекса с микротуннелем, спроектированный в соответствии с требованиями международных стандартов [4]. Стационарные режимы работы дизеля и результаты определения ТЧ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений величин PT_m , PT и $C_{ТЧ}$ на стационарных контрольных режимах

Контрольные режимы испытаний					Результаты испытаний		
№ реж.	n , мин ⁻¹	M_k , Н·м	P_e , кВт	L , %	PT_m , г/ч	PT , г/кВт·ч	$C_{ТЧ}$, г/мн ³
1	2000	478,0	100,1	100	37,82	0,378	0,063
2	2000	351,4	73,6	73,5	20,82	0,283	0,038
3	2000	239,0	50,05	50	20,06	0,401	0,042
4	2000	119,5	25,02	25	25,32	1,012	0,062
5	1500	541,2	85,01	100	30,10	0,354	0,074
6	1500	407,7	64,03	75,3	15,61	0,244	0,044
7	1500	274,8	42,95	50,5	11,07	0,258	0,034
8	1500	140,6	22,08	26,0	6,88	0,311	0,023
9	1000	379,6	39,74	100	24,42	0,614	0,125
10	1000	281,2	29,44	74,1	13,06	0,444	0,071
11	1000	189,1	19,8	49,8	5,50	0,278	0,030
12	1000	92,1	9,642	24,3	3,48	0,361	0,019

Погрешность измерительного комплекса при определении контролируемых величин составила от 4...7% - при значительном содержании ТЧ в ОГ дизеля (преимущественно на режимах с нагрузкой 50-100%) до 14...17% - при малом содержании ТЧ в ОГ (на режимах с нагрузкой 25%). Средние погрешности измерений величин PT_m , PT и $C_{тч}$ (вычисленные как средние статистические [5]) составили 8...10% или $\pm 1,78$ г/ч, $\pm 0,04$ г/кВт·ч и $\pm 0,005$ г/мн³, соответственно.

Анализ результатов исследований и получение зависимостей массового, удельного выбросов и концентрации ТЧ от параметров n и L

Полученные экспериментальным путем данные о выбросах и концентрациях ТЧ на контрольных режимах испытаний использовались для определения регрессионных зависимостей:

$$Y = f(n, L),$$

где Y – обобщенное обозначение значений контролируемых величин – PT_m , PT и $C_{тч}$; $f(n, L)$ – уравнение регрессии, функция 2-х переменных – n и L .

Так как вид уравнений регрессии, обеспечивающих достаточную точность, не был известен заранее, то рассматривались 3 вида уравнений.

- вид 1:

$$Y = K_1 \cdot f_n(Y) \cdot f_L(Y), \quad (1)$$

где K_1 – постоянный коэффициент; $f_n(Y)$ и $f_L(Y)$ – функции одной переменной, характеризующие влияние каждого из параметров n и L на величину Y ;

- вид 2:

$$Y = K_2 + f_n(Y) + f_L(Y), \quad (2)$$

где K_2 – постоянный коэффициент;

- вид 3:

$$Y = A_0 + A_1 \cdot n + A_2 \cdot L + A_{11} \cdot n^2 + A_{22} \cdot L^2 + A_{12} \cdot n \cdot L, \quad (3)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_{11}, A_{22}, A_{12}$ – постоянные коэффициенты.

Выбор указанных уравнений обусловлен широким спектром их применения, простотой определения и удобством использования при анализе и расчетных исследованиях. В работе [6] показано, что зависимость 1 может использоваться при вычислениях топливно-экономических показателей ДВС по результатам многофакторного эксперимента.

В качестве критериев точности значение Y , определенного по каждому из уравнений рассматривались средние квадратические отклонения (СКО) расчетных данных от соответствующих экспериментальных значений, выраженные в абсолютных единицах (с размерностью величины Y) – S_Y и в относительных единицах (%) – s_Y :

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_{pi} - Y_i)^2}{m(m-1)}}, \quad (4)$$

где Y_{pi} – значение Y , вычисленное с помощью уравнения регрессии на i -м режиме; Y_i – экспериментальное значение величины Y на i -м режиме; $m = 12$ – количество контрольных режимов испытаний;

$$s_Y = \frac{S_Y}{Y_{cp}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где Y_{cp} – средние значения величины Y в ходе эксперимента, равные для PT_m , PT и $C_{тч}$ 17,85 г/ч, 0,411 г/кВт·ч и 0,052 г/мн³, соответственно.

Коэффициенты K_1 , K_2 и функции $f_n(Y)$, $f_L(Y)$, входящие в выражения (1) и (2), были определены по методике, изложенной в работе [6], а для вычисления коэффициентов A_i зависимости (3) использована методика, представленная в работе [7] (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2. Результаты вычислений коэффициентов зависимостей (1) – (3)

Величина	Зависимость	Значения постоянных коэффициентов							
		K_1	K_2	A_0	A_1	A_2	A_{11}	A_{22}	A_{12}
PT_m	1	0,072	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-17,9	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	2,032	-5,4E-3	-1,1E-1	9,3E-6	4,2E-3	-1,1E-4
PT	1	2,752	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-0,41	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0,947	-1,1E-3	3,2E-3	6,6E-7	1,1E-4	-1,2E-5
$C_{тч}$	1	23,05	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-0,05	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0,0215	-8,8E-5	1,5E-3	4,5E-8	1,0E-5	1,4E-6

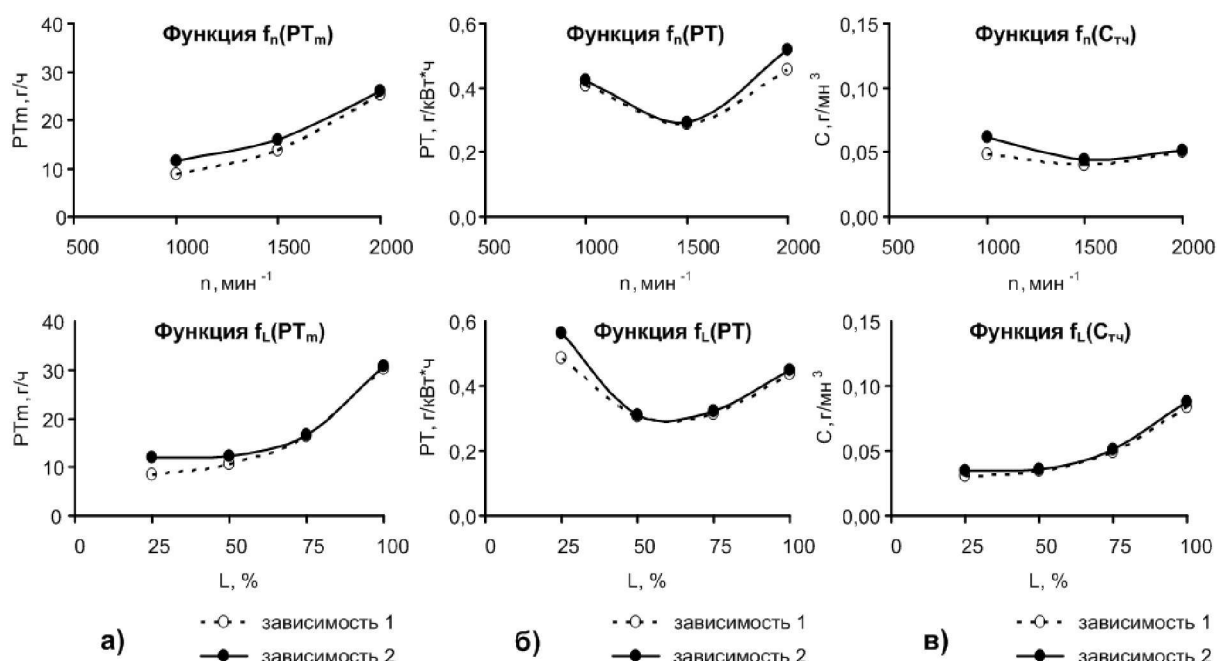


Рис. 1. Функции одной переменной $f_n(Y)$ и $f_L(Y)$, характеризующие влияние n и L на:
а) массовый выброс – PT_m ; б) удельный выброс – PT ; в) концентрацию – $C_{тч}$

Для каждой зависимости (1) – (3) с помощью выражений (4) и (5) определены значения СКО – S_Y и s_Y (табл. 3).

Как видно из табл. 3, зависимости 1 и 2 не обладают достаточной точностью, так как значения s_Y для них составляют 29,3...38,6% (за исключением значения $s_{PT_m} = 14,1\%$ для зависимости 2). Для полиномиальной зависимости 3 значения s_{PT_m} и $s_{C_{тч}}$ сопоставимы со средней погрешностью эксперимента, а значение s_{PT} превышает ее в 1,9 раза. Таким обра-

зом, из 3-х рассмотренных зависимостей наиболее достоверной является полином 2-го порядка (3), который использовался для проведения дальнейшего анализа (рис. 2).

Следует отметить, что полиномиальная зависимость (3) позволяет достаточно точно оценивать влияние параметров n и L на величины PT_m и $C_{тч}$ и может использоваться для приближенной оценки значений величины PT .

Таблица 3. Абсолютные и относительные значения СКО зависимостей (1) – (3)

Зависимость	Абсолютные СКО - S_Y			Относительные СКО - $s_Y, \%$		
	$S_{PT_m}, \text{г/ч}$	$S_{PT}, \text{г/кВт*ч}$	$S_{C_{тч}}, \text{г/мн}^3$	s_{PT_m}	s_{PT}	$s_{C_{тч}}$
1	5,27	0,121	0,0181	29,5	29,3	34,7
2	2,52	0,159	0,0176	14,1	38,6	33,7
3	2,02	0,077	0,0042	11,3	18,8	8,1

Анализ графиков, представленных на рис. 2, показывает следующее:

- массовый выброс ТЧ – PT_m с увеличением n с 1000 до 2000 мин^{-1} при фиксированном значении L возрастает по близкой к линейной зависимости с угловым коэффициентом 0,015 (г/ч)/ мин^{-1} ; увеличение L с 25 до 60% мало сказывается на росте PT_m , но возрастание нагрузки в диапазоне в диапазоне 60...100% приводит к существенному росту выброса

ТЧ; минимальное значение $PT_m = 3,0$ г/ч наблюдается при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $L = 25\%$, максимальное – 37,4 г/ч – при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $L = 100\%$;

- удельный выброс ТЧ – PT при возрастании n с 1000 до 2000 мин^{-1} изменяется в зависимости от величины нагрузки: при $L = 25\%$ - возрастает от 0,34 до 0,91 г/кВт*ч, при $L = 100\%$ - убывает от 0,67 до 0,36 г/кВт*ч; при этом с ростом L от 25 до 100% возрастающая зависимость PT от n плавно переходит в

убывающую; минимальное значение PT – 0,25 г/кВт·ч наблюдается при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $L = 75\%$, максимальное – 0,91 г/кВт·ч – при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $L = 25\%$;

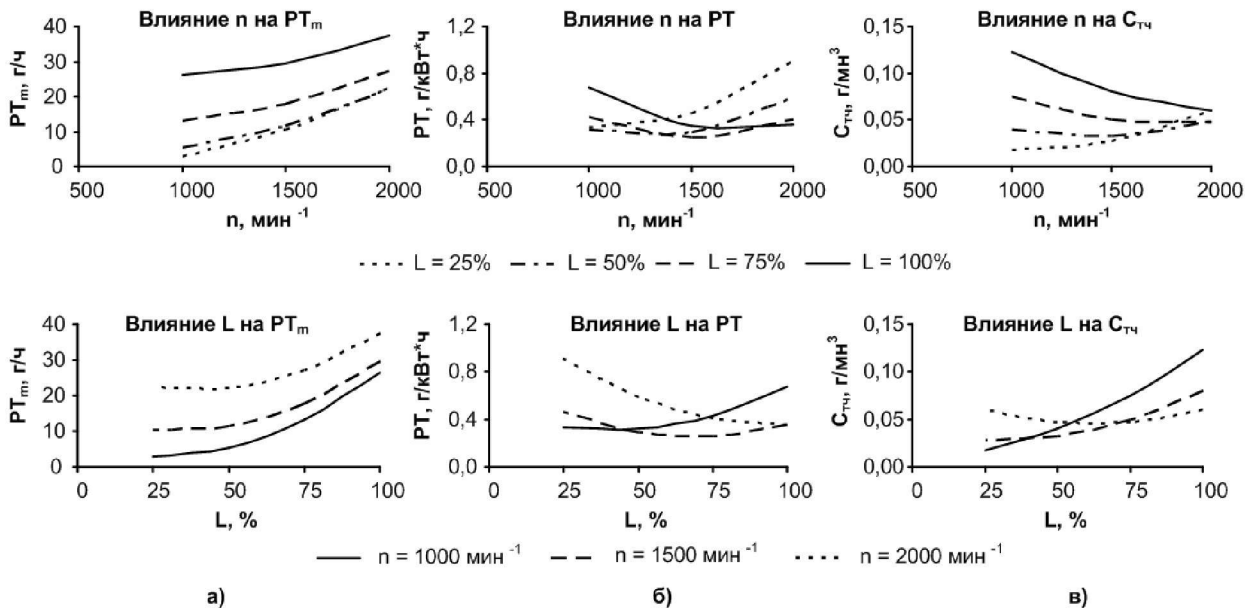


Рис 2. Уравнения регрессии в виде полиномов 2-го порядка для оценки:
а) массового выброса ТЧ – PT_m ; б) удельного выброса ТЧ – PT ; в) концентрации ТЧ – $C_{тч}$

- концентрация ТЧ – $C_{тч}$ при увеличении n с 1000 до 2000 мин^{-1} изменяется в зависимости от значения нагрузки: при $L = 25\%$ - возрастает от 0,02 (минимальное значение) до 0,06 г/мн^3 , при $L = 100\%$ - убывает от 0,12 (максимальное значение) до 0,06 г/мн^3 ; при этом с ростом L от 25 до 100% возрастающая зависимость $C_{тч}$ от n плавно переходит в убывающую.

Результаты проведенного анализа позволяют повысить точность измерений выбросов ТЧ путем корректировки продолжительности отбора проб ТЧ с учетом их содержания в ОГ дизеля: при малом содержании ТЧ данная продолжительность должна увеличиваться, при значительном содержании ТЧ – сокращаться.

Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований автомобильного дизеля на стационарных режимах работы и анализа полученных данных:

1. Получены уравнения регрессии в виде полиномов 2-го порядка, описывающие влияние частоты вращения коленчатого вала n и нагрузки L на установившихся режимах работы дизеля на массовый выброс – PT_m , удельный выброс – PT и концентрации ТЧ – $C_{тч}$ (СКО полиномов составили: $s_{PT_m} = 11,3\%$, $s_{PT} = 18,8\%$, $s_{C_{тч}} = 8,1\%$ при средней погрешности

эксперимента - 10%).

2. Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность измерений выбросов ТЧ с ОГ дизеля путем корректировки продолжительности отбора проб ТЧ с учетом их содержания в ОГ.

Список литературы:

1. Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Уч. пособие / В.А. Звонов, Л.С. Заиграев, В.И. Черных, А.В. Козлов; Под ред. Звонова В.А. – Луганск: изд-во СНУ им. В. Даля, 2004. – 268 с.
2. Поливянчук А.П. Исследование степени токсичности вредных веществ, выбросы которых нормируются европейскими экологическими стандартами / А.П. Поливянчук, Е.Ю. Щепак, Е.Ю. Титова // Сб. научн. трудов Национального технического ун-та „ХПИ“. – 2007. – №2. – С. 112-115.
3. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия / И.В. Парсаданов – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
4. Звонов В.А. Оценка выбросов твердых частиц с отработавшими газами автотракторного дизеля / В.А. Звонов, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 2 – С. 64–67.
5. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике / М.Я. Выгодский. М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1954. – 412 с.
6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х. – М.: «Мир», 1972. – 382 с.
7. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента / Рафалес-Ламарка Э.Э. – Луганск, Укр. проектно-констр. и научно-исслед. ин-т «УкрНИИПуглеобогатение», 1969. – 126